



ANÁLISE DO DESEMPENHO DO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO POR MEIO DE ENSAIOS RECOMENDADOS EM NORMA TÉCNICA E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Vinícius Marcos Pinheiro*¹, Cássio Alves de Oliveira¹, Bruno Lemos Neves¹, Luciano Coutinho Gomes¹

¹FEELT – Universidade Federal de Uberlândia

Resumo – Este trabalho apresenta um estudo realizado para a determinação dos parâmetros do circuito equivalente de um motor de indução trifásico a partir dos ensaios recomendados pela norma NBR17094-3:2018 da Associação Brasileira de Normas Técnicas, além da verificação do seu desempenho por meio da variação de carga em seu eixo, utilizando para isso, simulação computacional. Os parâmetros obtidos durante a realização dos ensaios são utilizados em software para a análise do fator de potência em diferentes situações de carga.

Palavras-Chave – Motor de indução trifásico, NBR17094-3:2018, parâmetros, simulação computacional.

ANALYSIS OF THE PERFORMACE OF THE THREE-PHASE INDUCTION MOTOR THROUGH TESTS RECOMMENDED IN TECHNICAL STANDARD AND COMPUTATIONAL SIMULATION

Abstract - This work presents a study carried out to determine the parameters of the equivalent circuit of a three-phase induction motor based on the tests recommend from NBR17094-3:2018 – Brazilian Association of Technical Standards – in addition to the verification of its performance through the variation of load on its shaft, using computational simulation. The parameters obtained during the tests are used in software for the analysis of power factor in different load situations.

Keywords – Three phase induction motor, NBR17094-3:2018, parameters, computational simulation.

I. INTRODUÇÃO

Os motores de indução são máquinas elétricas cuja invenção é datada do ano de 1888, sendo a patente original

*viniciusmarcospinheiro@hotmail.com

pertencente a Nikola Tesla [1]. Tais motores logo passaram a ser largamente utilizados nas indústrias, para tornar os processos mais práticos e rápidos. Geralmente, a principal carga elétrica de uma indústria está concentrada neste tipo de equipamento, o que mostra o quão importante é sua análise, para verificar alguns fenômenos que podem estar interferindo no sistema elétrico, principalmente, no ambiente interno à indústria, como exemplo, o baixo fator de potência, que pode até acarretar multas.

Para a análise de qualquer equipamento, é crucial seguir uma diretriz para a aquisição dos parâmetros do mesmo. Desta maneira, as normas surgem com esse objetivo, ou seja, elas visam destacar como e quando os procedimentos devem ser realizados, os cuidados que devem ser tomados e como efetuar os devidos cálculos para a determinação dos parâmetros do equipamento em estudo.

Por meio dos parâmetros bem definidos, a utilização dos recursos computacionais possibilita o estudo do comportamento do motor em diversas situações, muitas das quais não seriam passíveis de serem realizadas na prática.

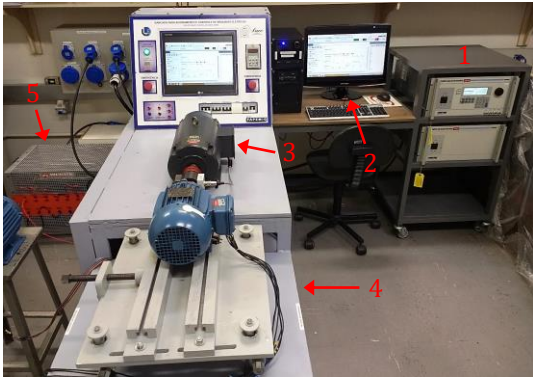
Sendo assim, o objetivo deste trabalho foi efetuar o levantamento dos parâmetros do circuito equivalente de um motor de indução trifásico a partir das recomendações apresentadas na NBR17094-3:2018 [2]. Posteriormente, com os valores dos parâmetros em mãos, realizou-se a análise, por meio de simulação computacional, do comportamento do motor em alguns regimes de operação, observando os valores de fator de potência para cada caso.

II. MATERIAIS UTILIZADOS

A. Plataforma de ensaios

Na Figura 1 é apresentada a plataforma implementada para a realização dos ensaios com o motor de indução trifásico. Tal plataforma conta com: (1) fonte programável, (2) microcomputador, (3) máquina de corrente contínua, (4) bancada metálica e (5) banco de resistência.

Figura 1 - Plataforma de ensaios



B. Motor de indução trifásico analisado

Na Tabela 1 são apresentados os dados de placa do motor de indução analisado.

Tabela 1 - Dados de placa do motor de indução trifásico analisado

Motor de indução trifásico gaiola de esquilo WEG®	
Categoria N – 60Hz – IP55 – F.S 1,15 – S1 – Classe Isol F	
Potência (KW/CV)	2,2/3,0
Tensão (Δ/Y)	220/380V
Corrente (Δ/Y)	8,39/4,86A
Fator de potência	0,84
Velocidade	3450 rpm
I_p/I_n	6,7

C. Simulação computacional.

A simulação computacional do motor de indução trifásico é realizada através de um modelo já presente no programa PSIM®. O intuito da simulação é estudar alguns regimes de operação que serão, posteriormente, definidos.

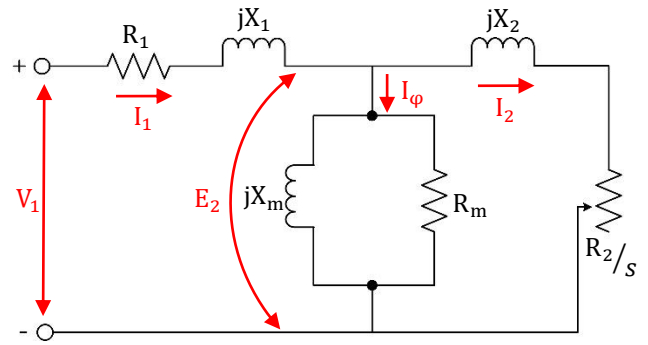
III. METODOLOGIA APLICADA

A. Circuito equivalente do motor de indução trifásico

O circuito equivalente do motor de indução trifásico [3], está representado pela Figura 2. O respectivo circuito é uma representação por fase, ou seja, corresponde a um circuito equivalente monofásico, sendo as demais fases obtidas defasando a corrente e a tensão de $\pm 120^\circ$.

Para obter os parâmetros do circuito equivalente, devem ser realizados três ensaios seguindo a NBR17094-3:2018, os quais são: ensaio para determinação da resistência do enrolamento do estator, ensaio de rotor bloqueado e ensaio a vazio.

Figura 2 – Circuito equivalente do motor de indução trifásico



Onde:

\hat{I}_1 – Corrente do estator.

V_1 – Tensão no terminal do estator.

X_1 – Reatância de dispersão do estator.

R_1 – Resistência do estator.

R_2 – Resistência do rotor.

X_2 – Reatância de dispersão do rotor.

\hat{I}_ϕ – Corrente de excitação.

\hat{I}_2 – Corrente de carga.

E_2 – Força contra eletromotriz.

R_m – Resistência representativa das perdas no núcleo.

X_m – Reatância de magnetização.

B. Características dos ensaios conforme a NBR17094-3:2018

Os parâmetros do motor de indução trifásico necessários para a sua análise são obtidos por meio de ensaios práticos, seguindo os passos descritos pela norma brasileira NBR17094-3:2018. Tal norma trata a respeito dos vários tipos de ensaios possíveis de serem realizados com o motor de indução trifásico.

A norma NBR17094-3:2018 descreve os ensaios a serem realizados, como são apresentados a seguir.

1) Ensaio para determinação da resistência do enrolamento do estator

Segundo a NBR17094-3:2018, pode-se determinar a resistência de enrolamento a partir de três métodos, os quais são:

- Ohmímetro de precisão.
- Método da tensão e corrente.
- Método da ponte.

A medição da resistência de enrolamento foi realizada aplicando-se corrente contínua nos terminais da máquina de indução utilizando o método da tensão e corrente. Indiretamente, pode-se utilizar a medição da resistência de enrolamento para verificar a integridade do mesmo, averiguando a existência de curtos circuitos nas espiras ou contatos em condições não ideais, por meio da comparação dos valores de resistências medidos e os fornecidos pelo fabricante.

De posse dos valores de tensão e corrente, pode-se determinar o valor da resistência a partir da Lei de Ohm, definida pela Equação (1).

$$RI = V \quad (1)$$

Onde:

R – Resistência.

I – Corrente.

V – Tensão.

Por fim, é importante corrigir cada resistência do enrolamento para uma temperatura base definida pela norma, que é a temperatura ambiente de 25°C, para, posteriormente, calcular a média aritmética das mesmas. Tal correção é realizada por meio da Equação (2).

$$R_s = \frac{R_t(t_s + k)}{(t_t + k)} \quad (2)$$

Onde:

R_s – Resistência do enrolamento corrigida para uma temperatura especificada, t_s .

t_s – Temperatura especificada para correção da resistência, em graus Celsius.

R_t – Resistência do enrolamento obtida no ensaio à temperatura t_t .

t_t – Temperatura do enrolamento no momento da medição da resistência, em graus Celsius.

k – Constante baseada no material condutor do enrolamento. (Para cobre eletrolítico com 100% de condutividade $K=234,5$. Para alumínio com condutividade em volume de 62%, $K=225$).

Vale ressaltar, como a norma recomenda, que as medições em cada ensaio devem possuir duração máxima de um minuto, devido à elevação de temperatura do enrolamento do estator que ocorre quando o ensaio é executado.

É importante salientar que as medições das correntes e tensões são efetuadas via sistema operacional da própria fonte de alimentação, presente em um microcomputador. Sendo assim, para cada nível de tensão estipulado, é realizada a coleta de uma medição para cada fase e medida a temperatura do enrolamento utilizando um termopar.

2) Ensaio de rotor bloqueado

A realização do ensaio de rotor bloqueado visa a determinação das reatâncias de dispersão do motor de indução trifásico, assim como a resistência do rotor. Mantendo-se o eixo do motor completamente bloqueado, aplica-se tensão reduzida, a qual é elevada gradativamente de tal forma a se obter corrente nominal.

A NBR17094-3:2018 estabelece algumas diretrizes a serem seguidas antes da realização do presente ensaio, as quais são:

- O meio mecânico de bloqueio do rotor deve ter rigidez adequada para evitar possível risco ao pessoal ou dano ao equipamento.
- O sentido de rotação deve ser estabelecido antes do ensaio.
- O motor deve estar aproximadamente à temperatura ambiente antes do início do ensaio.

Um ponto importante para se obter as medidas é com relação à temperatura do motor, que não deve ultrapassar o limite de elevação de temperatura nominal somado de 40°C, para não danificar o isolamento dos enrolamentos.

3) Ensaio a vazio

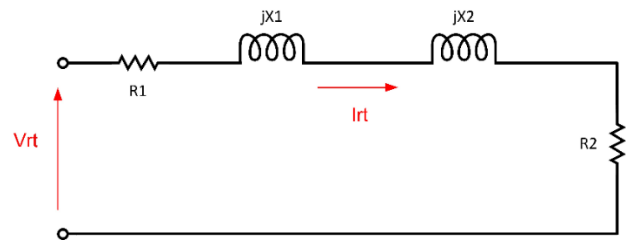
A realização do ensaio a vazio ocorre sob tensão e frequência nominal, sem carga, ou seja, com o eixo totalmente livre. O objetivo do ensaio a vazio pode ser resumido na determinação dos parâmetros do ramo magnetizante.

É recomendado pela NBR17094-3:2018 que, para este ensaio, as medições só sejam realizadas após a estabilização da potência de entrada, pois, assim, assegura-se que o valor da perda por atrito seja obtido de forma mais precisa, visto que o excesso de graxa nos mancais e nas partes móveis do motor acabam interferindo na variação da potência de entrada até que a condição de operação esteja estabilizada. Segundo a respectiva norma, o ponto de estabilização é alcançado quando a potência absorvida em vazio não variar mais que 3% entre duas leituras consecutivas, realizadas em um intervalo de tempo de 30 minutos.

C. Equacionamento para os cálculos dos parâmetros do circuito equivalente

Os cálculos dos parâmetros do circuito equivalente são realizados a partir do ensaio de rotor bloqueado e do ensaio a vazio. A determinação dos parâmetros inicia-se a partir da Figura 3, que representa o circuito equivalente do motor de indução trifásico para o ensaio de rotor bloqueado.

Figura 3 – Circuito equivalente para ensaio de rotor bloqueado



Onde:

V_{rt} – Tensão por fase de rotor bloqueado.

I_{rt} – Corrente por fase de rotor bloqueado.

Primeiramente, deve-se ter em mente que os cálculos dos parâmetros são realizados por fase, logo, é importante atentar-se ao utilizar os valores de corrente, tensão e potência. Outro ponto importante a se destacar é a utilização do valor da média aritmética das medições mensuradas nas três fases do motor.

A Equação (3) permite calcular a resistência de rotor bloqueado a partir dos dados obtidos durante o ensaio à temperatura registrada.

$$R_{rt} = \frac{P_{rt}}{I_{rt}^2} \quad (3)$$

Onde:

R_{rt} – Resistência do enrolamento de rotor bloqueado.

P_{rt} – Potência ativa por fase de rotor bloqueado.

Posteriormente, pode-se calcular a impedância de rotor bloqueado por meio da Equação (4).

$$Z_{rt} = \frac{V_{rt}}{I_{rt}} \quad (4)$$

Onde:

Z_{rt} – Impedância de rotor bloqueado.

De posse dos valores da resistência e da reatância de rotor bloqueado, torna-se possível determinar o valor da reatância de rotor bloqueado por meio da Equação (5).

$$X_{rt} = \sqrt{Z_{rt}^2 - R_{rt}^2} \quad (5)$$

O próximo passo é separar as reatâncias de dispersão tanto do rotor, quanto do estator, da reatância de rotor bloqueado. Para tal, utiliza-se como auxílio a Tabela 2.

Tabela 2 - Frações das reatâncias do estator e rotor

Classe	Descrição	X_1	X_2
A	Conjugado de partida e corrente de partida normais	0,5	0,5
B	Conjugado de partida normal e corrente de partida baixa	0,4	0,6
C	Conjugado de partida elevado e corrente de partida baixa	0,3	0,7
D	Conjugado de partida elevado e escorregamento elevado	0,5	0,5
Rotor bobinado	Desempenho varia segundo a resistência do rotor	0,5	0,5

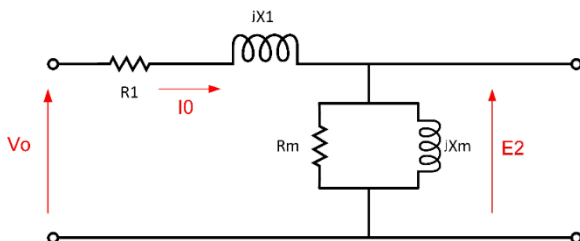
Fonte: Fitzgerald, 2006.

É possível, ainda, dividir a resistência de rotor bloqueado nas resistências do rotor e do estator. Vale destacar que, como o motor possui um rotor de gaiola, não é possível determinar diretamente o valor da resistência do rotor, contudo, há como estimar o valor desta, empregando-se, para isso, a Equação (6).

$$R_{rt} = R_1 + R_2 \quad (6)$$

Por fim, de posse das medições obtidas durante o ensaio a vazio, pode-se realizar os cálculos dos parâmetros do ramo magnetizante. Para isso, utiliza-se como auxílio o circuito equivalente apresentado na Figura 4.

Figura 4 – Circuito equivalente para o ensaio a vazio



Onde:

V_o – Tensão por fase a vazio.

I_o – Corrente por fase a vazio.

Primeiramente, deve-se calcular a tensão que está sobre o ramo magnetizante para poder determinar o valor da

reatância de magnetização e da resistência representativa das perdas no núcleo, o que pode ser realizado por meio da Equação (7). O valor da resistência do enrolamento do estator deve ser corrigida para a temperatura do ensaio a vazio.

$$E_2 = V_o - (\sqrt{(R_1)^2 + (X_1)^2})I_o \quad (7)$$

Posteriormente, é necessário determinar os valores das correntes que circulam através da resistência de perdas no núcleo e da reatância de magnetização, as quais podem ser obtidas pelas Equações (8) e (9), respectivamente.

$$I_c = I_o \cos \varphi \quad (8)$$

$$I_m = I_o \sin \varphi \quad (9)$$

Onde:

φ – Ângulo do fator de potência.

I_c – Componente da corrente de excitação que circula na resistência representativa das perdas no núcleo.

I_m – Componente da corrente de excitação que circula na reatância de magnetização.

Por fim, pela Lei de Ohm, pode-se determinar o valor da resistência e da reatância do ramo magnetizante.

IV. RESULTADOS

A. Determinação dos parâmetros do circuito equivalente

De posse das médias dos valores obtidos durante os ensaios, que estão apresentadas nas Tabelas 3, 4 e 5, e seguindo os procedimentos descritos em III, obtém-se os valores dos parâmetros do circuito equivalente, que estão indicados na Tabela 6.

Tabela 3 - Médias das resistências do estator

	Fase A	Fase B	Fase C	Média
Resistência	2,184 Ω	2,167 Ω	2,172 Ω	2,174 Ω

Temperatura: 25°C em todas as fases

Tabela 4 - Médias das medições do ensaio de rotor bloqueado

	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (kW)	Temperatura
Média	43,3	8,52/4,92	0,1033	36°C

Tabela 5 - Médias das medições do ensaio a vazio

	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (kW)	Fator de potência	Temperatura
Média	219,97	4,350/2,511	0,076	0,14	48°C

Tabela 6 – Parâmetros calculados do circuito equivalente

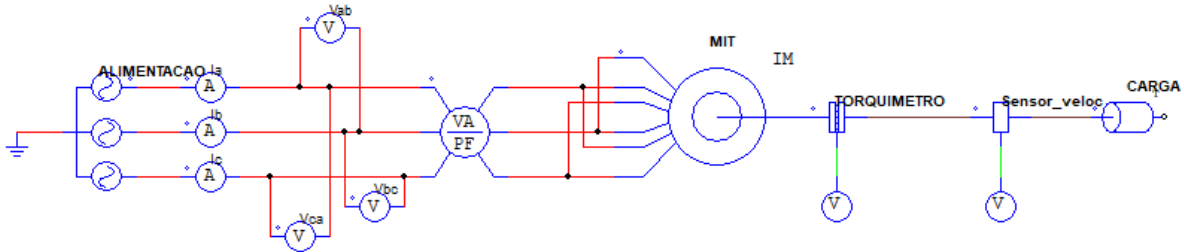
Parâmetro	Valor	Temperatura
R_1	2,174 Ω	25°C
R_2	1,926 Ω	25°C
X_1	3,847 Ω	-
X_2	3,847 Ω	-
X_m	84,660 Ω	-
R_m	550,000 Ω	25°C

B. Simulação computacional

A simulação computacional do motor visa analisar o comportamento do mesmo em regime permanente, desconsiderando, portanto, o regime transitório. Sendo assim, o método de partida não irá interferir no estudo a ser realizado, logo, empregou-se a partida direta.

Todas as simulações foram realizadas no PSIM®, a partir do circuito apresentado na Figura 5.

Figura 5 - Circuito realizado no PSIM® para a simulação



Foi realizado o ensaio experimental com variação de carga, utilizando, para isso, uma máquina de corrente contínua acoplada ao eixo do motor de indução. Tal procedimento possui como objetivo possibilitar uma comparação com a simulação realizada. Os valores obtidos estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Medições do ensaio experimental com variação de carga

Carga com relação a corrente nominal do MIT (%)	Fator de potência			
	Fase A	Fase B	Fase C	Média
100%	0,86	0,86	0,87	0,863
75%	0,82	0,81	0,82	0,816

A primeira análise computacional foi realizada considerando carga nominal, a qual pode ser calculada por meio da Equação (10).

$$T = \frac{P}{w} \quad (10)$$

Onde:

T – Torque.

P – Potência nominal do motor.

w – Velocidade angular nominal.

Sendo a potência do motor igual a 2200W e a velocidade nominal igual a 3450 rpm, ao substituir na Equação (10), obtém-se o valor do torque nominal, que será utilizado no dimensionamento da carga.

$$T = \frac{2200}{\frac{\pi}{30} \times 3450} = 6,089 \text{ N.m}$$

Este trabalho focou-se na análise do fator de potência para dois pontos de cargas, como pode ser constatado na Tabela 7. Para o primeiro ponto, a carga da simulação foi ajustada de tal forma que o motor trabalhasse com carga nominal. A Figura 6 representa o fator de potência obtido para o respectivo ponto. O fator de potência da simulação resultou em um valor de 0,850, que, comparado com o valor médio de

0,863, obtido durante o ensaio experimental, presente na Tabela 7, evidencia a coerência dos resultados teóricos.

Para corroborar melhor os resultados, foi analisado outro ponto de carga, como está apresentado na Tabela 7, cujo valor é de 75% em relação a carga nominal.

Figura 6 – Fator de potência x Tempo (s) 100%/0,850

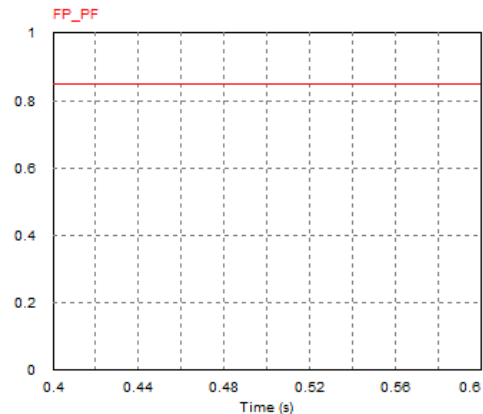
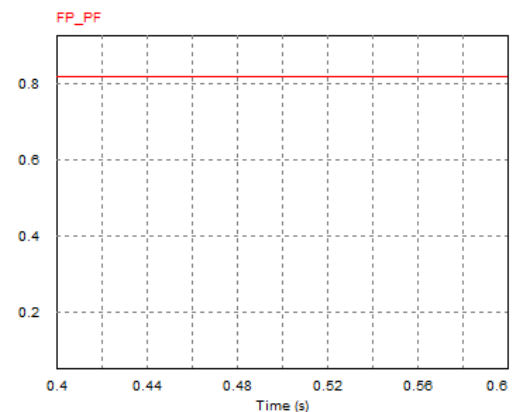


Figura 7 – Fator de potência x Tempo (s) 75%/0,819

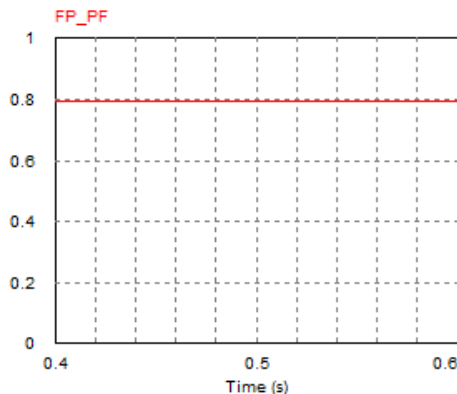


A Figura 7 representa o fator de potência obtido na simulação para 75% de carga. O valor do fator de potência registrado para este ponto de carga durante a simulação foi de 0,819, que, comparado com o valor médio de 0,816, obtido durante o ensaio, apresentado na Tabela 7, indica a confiabilidade dos resultados obtidos com a simulação.

A redução da carga ou o superdimensionamento dos motores pode influenciar na queda do fator de potência de um sistema elétrico, como pôde ser verificado anteriormente durante a realização dos ensaios experimentais e simulações. Quando se considera uma indústria, onde este tipo de equipamento geralmente representa a maior parte de sua carga elétrica, este problema pode tornar-se significativo.

Considerando agora um sistema de três motores operando com, respectivamente, 75%, 65% e 50% de carga, tem-se o fator de potência representado pela Figura 8.

Figura 8 – Fator de potência x Tempo (s) – Sistema com três motores a 75%, 65% e 50% de carga



Para o sistema operando com 75%, 65% e 50%, o fator de potência registrado foi de 0,795.

Tendo em vista que a quantidade de motores em uma indústria pode ser bem maior que a quantidade de motores utilizados nas análises anteriores, é possível constatar a acentuada queda do fator de potência com o superdimensionamento dos motores.

O baixo fator de potência pode acarretar multas, como é estabelecido pela Agência Nacional de Energia Elétrica através do Artigo nº 95 da Resolução ANEEL nº414 de 09 de setembro de 2010 [4]. Nos casos em que o fator de potência não contemple o valor indicado na norma, é necessário realizar a correção do mesmo através do emprego de banco de capacitores para este caso em análise. Sendo assim, o dimensionamento adequado do motor de indução trifásico contribui na minimização de tal problema.

V. CONCLUSÕES

Seguir as recomendações da norma possibilitou a realização dos ensaios de forma prática e segura. Consequentemente, as medições para os cálculos dos parâmetros do circuito equivalente do motor de indução trifásico contribuíram decisivamente para a obtenção dos parâmetros da forma mais exata possível.

Por meio das simulações computacionais realizadas, pôde ser verificado que os parâmetros do motor de indução trifásico, obtidos por procedimentos dispostos na norma NBR17094-3:2018, mostraram-se coerentes, devido ao fato dos resultados das simulações terem se aproximado dos resultados dos experimentos práticos.

A análise dos motores superdimensionados permite verificar o quão importante é realizar o dimensionamento adequado de tal máquina de acordo com a carga que será acoplada ao seu eixo, tendo-se em vista a influência direta sobre o fator de potência, onde o mesmo decai sempre que houver uma carga menor que a nominal, como foi apresentado.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à FAPEMIG, CAPES e ao CNPq pelo apoio financeiro, e à Universidade Federal de Uberlândia pela infraestrutura disponibilizada.

REFERÊNCIAS

- [1] F. L. da Silveira e N. L. R. Marques. “Motor elétrico de indução: uma das dez maiores invenções de todos os tempos”. Caderno Brasileiro de Ensino de Física. v. 29, n. 1, p. 114-129. São Paulo, 2012.
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR17094-3:2018: máquinas elétricas girantes. Parte 3: Motores de indução trifásicos: métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2018.
- [3] A. E. Fitzgerald. Máquinas Elétricas: com introdução a eletrônica de potência. Tradução: Anatólio Laschuk. Bookman. 6. ed. Porto Alegre, 2006.
- [4] RESOLUÇÃO ANEEL Nº414 DE 09 DE SETEMBRO DE 2010. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/documents/656877/14486448/bren2010414.pdf/3bd33297-26f9-4ddf-94c3-f01d76d6f14a?Version=1.0>. Acesso em: 1 fev. 2018.